

# Abfallvergasungstechnik mit Direktschmelze zur Energie- und Materialrückgewinnung

Nobuhiro Tanigaki und Yoshihiro Ishida

1.	Einführung.....	528
2.	Materialien und Verfahren .....	529
2.1.	Abfallvergasung mit Direktschmelze.....	529
2.2.	Prozessbeschreibung.....	530
2.3.	Vergasungskriterien .....	532
3.	Ergebnisse und Diskussion .....	533
3.1.	Betriebsdaten .....	533
3.2.	Abfallflexibilität .....	535
3.3.	Emissionen .....	536
3.4.	Schlacken-, Metall- und Flugaschebestandteile.....	537
3.5.	Schwermetallverteilungen.....	537
3.6.	Auswaschverhalten und Nutzung der Schlacke .....	539
4.	Schlussfolgerungen .....	540
5.	Literatur .....	541

Die Vergasung von Siedlungsabfall ist ein weltweit erforshtes Thema und hat sich als eine alternative thermische Behandlungsmöglichkeit von Abfall bewährt. Das Direct-Melting-System (DMS = Direktschmelzverfahren) ist eine Schachtofenvergasungs- und -schmelztechnik für verschiedene Arten von Abfällen. Sie weist mehr als 40 Referenzen auf und wird seit 35 Jahren eingesetzt. Diese Vergasungstechnik wird zur Verarbeitung von Siedlungsabfall zusammen mit Abfällen unterschiedlicher Art verwendet, wie beispielsweise Klärschlamm, Klinikabfälle oder Asche aus Verbrennungsanlagen. Ihr Vorteil ist die simultane Rückgewinnung von sowohl Energie als auch Material in einem Prozessablauf.

Abfallflexibilität ist einer der Vorzüge der Vergasungstechnik mit Direktschmelze. Der Abfall wird dem Vergaser ohne Vorbehandlung zugeführt. Die Referenzanlagen in Japan verarbeiten nicht nur Siedlungsabfall, sondern auch andere Abfälle wie Klärschlamm, Klinikabfälle, Bodenasche aus Verbrennungsanlagen, aus Abfalldeponien rückgewonnene Abfälle und Reststoffe aus Altfahrzeug-Shredderanlagen.

Das System arbeitet sehr schadstoffarm. Insbesondere der Chlorwasserstoff- und Schwefeldioxydausstoß ist dank der Entschwefelungswirkung von Kalkstein im Vergaser äußerst gering. Die Emissionen am Kamin sind wesentlich geringer als die Vorgaben europäischer Vorschriften.

Durch die Hochtemperaturvergasung werden toxische Schwermetalle wie Blei und Zink vom Vergaser verflüchtigt und sammeln sich in der Flugasche. Die Schlacken- und Metallprodukte enthalten daher nur geringe Mengen toxischer Schwermetalle, so dass ein vollständiges Recycling in Verbundstein- und Betonzuschlag oder Baustoffe ohne zusätzliche Behandlung möglich ist.

## 1. Einführung

Unter Vergasung versteht man die Umwandlung eines kohlenstoffhaltigen Brennstoffes in ein gasförmiges Produkt mit einem nutzbaren Heizwert [9], ein Verfahren, das bei der Energieumwandlung aus Kohle und Biomasse breite Anwendung findet. Die Vergasung als Energierückgewinnungsmethode wurde weltweit vielfach untersucht. Es gibt eine Vielzahl von Forschungsberichten zu diesem Thema, insbesondere zur Vergasung von Biomasse [1, 3, 13].

Die Vergasung von Siedlungsabfall ist ein in Japan intensiv erforschtes Gebiet. Die Entwicklung der Siedlungsabfall-Vergasungstechnik wurde in Japan in den 70er Jahren des 20. Jahrhunderts in Angriff genommen. Die damalige Ölkrise löste ein großes Interesse an der Umwandlung von Siedlungsabfall in Energie und dem Recycling von anfallendem Siedlungsabfall aus. Das Direct Melting System (DMS), eine von Nippon Steel & Sumikin Engineering Co. Ltd. entwickelte Vergasungs- und Schmelztechnik, wurde im Jahr 1979 für die gewerbliche Nutzung in der Stadt Kamaishi in Japan eingeführt. Es gab damals auch weitere Vergasungstechniken für die gewerbliche Nutzung. Die Systeme Andco-Torrax und Purox wurden ebenfalls als Vergasungs- und Schmelztechniken für Siedlungsabfall eingesetzt. Andco-Torrax kam ab 1980 in der Stadt Hamamatsu zur Anwendung, Purox ab 1981 in der Stadt Chichibu. Doppel-Wirbelschichtvergaser wurden im Jahr 1979 in der Stadt Funabashi eingeführt. Heute findet jedoch nur noch die DMS-Technik Anwendung.

Bei der Abfallvergasungstechnik mit Direktschmelze handelt es sich um einen Schachtofenvergasungs- und -schmelzprozess, der als atmosphärischer Festbettvergaser klassifiziert wird. Diese Vergasungstechnik wird in Japan und Südkorea in mehr als 40 Anlagen kommerziell genutzt [12, 16, 21, 22]. Eine dieser kommerziellen Anlagen ist in Bild 1 dargestellt.

Abfallheizwerke (MHW) und Abfallheizkraftwerke (MHKW), die bei der Abfallbehandlung zusätzlich Energie gewinnen, sind insbesondere in Europa von großem Interesse. Aber auch die Materialrückgewinnung aus Beschickungsstoffen wie Siedlungsabfall und Bodenasche rückt mehr und mehr in den Vordergrund. Dabei ist vor allem die Materialrückgewinnung aus Siedlungsabfall-Bodenasche von Bedeutung [5], sowie auch die Rückgewinnung von Abfall aus AbfalldPONEN, da dieser verschiedene Wertstoffe

und Schwermetalle wie Gold und Kupfer sowie Eisen- und Nichteisenmetalle enthält. Klärschlamm enthält viel Phosphor, der in Düngemitteln für die Landwirtschaft Anwendung findet. Aus Sicht der Materialrückgewinnung, Energierückgewinnung und der Verringerung der endgültigen Deponieabfallmenge könnte sich eine gemeinsame Behandlung der vielen unterschiedlichen Siedlungsabfälle als eine der Möglichkeiten zur gleichzeitigen Lösung der verschiedenen Probleme erweisen, die mit dieser Thematik in Zusammenhang stehen. Die Vergasungstechnik mit Direktschmelze bietet sich als Lösungsansatz für diese Probleme an. Bodenasche aus Verbrennungsanlagen, rückgewonnene Abfälle aus Abfalldeponien und Klärschlamm können gemeinsam mit Siedlungsabfall in einem Vergasungsverfahren verarbeitet werden. In diesen Abfällen enthaltene brennbare Stoffe werden über eine Dampfkesselanlage in Energie umgesetzt, während nicht brennbare Stoffe in Wertstoffe wie Schlacke und Metall umgewandelt werden. Dadurch lässt sich die endgültige Deponieabfallmenge deutlich minimieren. Dies wiederum bedeutet, dass die Abfallvergasung mit Direktschmelze sich als Möglichkeit zur Energie- und Materialrückgewinnung in einem Durchgang anbietet.



Bild 1:

Abfallvergasungsanlage in Japan

Quelle: Stadt Kitakyushu

Diese Untersuchung behandelt die Abfallvergasung mit Direktschmelze in Kombination mit Energie- und Materialrückgewinnung. Darüber hinaus werden Angaben zu Prozessablauf, Abfallflexibilität, Kriterien für die Beurteilung der Vergasung, Abgasbestandteilen und Qualität der erhaltenen Schlacke gemacht.

## 2. Materialien und Verfahren

### 2.1. Abfallvergasung mit Direktschmelze

Bild 2 zeigt das typische Prozessablaufdiagramm einer Abfallvergasungsanlage. Die Anlage besteht im Wesentlichen aus einem Siedlungsabfall-Beschickungssystem, einem Vergaser, einer Verbrennungskammer, einem Dampferzeuger und einem Abgas-Reinigungssystem. Untersysteme wie ein Materialförderungssystem und ein Flugaschen-Behandlungssystem wurden ebenfalls entwickelt.

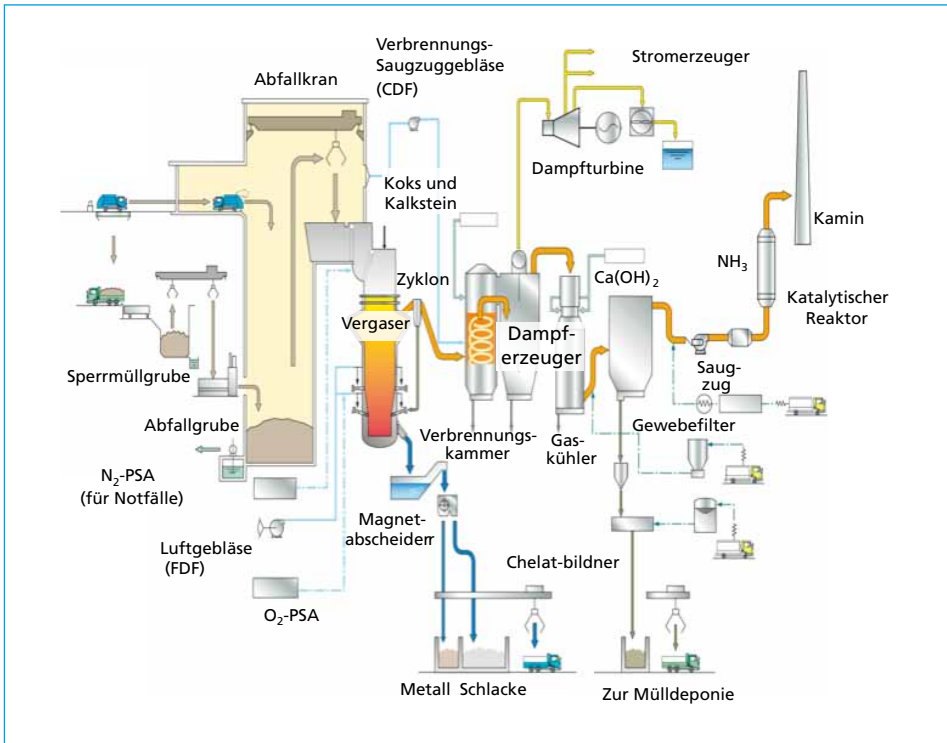


Bild 2: Prozess-Ablaufdiagramm des Direktschmelzsystems (DMS)

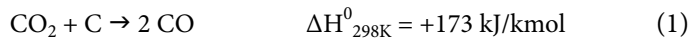
Diese Technik wird seit mehr als 35 Jahren und an mehr als 40 Orten gewerblich genutzt. Die Kapazitäten reichen von 10.000 Tonnen pro Jahr bis hin zu 230.000 Tonnen pro Jahr.

## 2.2. Prozessbeschreibung

Einer der Vorzüge der Abfallvergasungstechnik mit Direktschmelze ist die Tatsache, dass keine Vorbehandlung von Siedlungsabfall erforderlich ist, wodurch sie sich von anderen Vergasungstechniken wie beispielsweise der Wirbelschichtvergasung unterscheidet. Siedlungsabfall wird direkt von oben in einen Vergasungs- und Schmelzofen eingebracht, zusammen mit Koks und Kalkstein als Reduktionsmittel und zur Viskositätsregelung. Durch das Zufügen von Kalkstein wird die Viskosität geschmolzener Materialien geregelt, so dass die Schmelzmasse am Boden des Ofens reibungslos ohne Verstopfungsfahr ablaufen kann. Dem Vergaser wird an seinem Boden mit Sauerstoff angereicherte Luft über Düsen zugeführt. Der Vergaser enthält drei Hauptprozesse: einer Trocknungs- und Vorwärmzone, einer Zone für thermische Zersetzung und einer Verbrennungs- und Schmelzzone. Siedlungsabfall wird im oberen Bereich (Trocknungs- und Vorwärmzone) nach und nach getrocknet und vorgewärmt. Brennbare Abfälle werden in der zweiten Zone thermisch zersetzt und Synthesegas tritt oben am Vergaser aus. Das Syngas oder Synthesegas, das hauptsächlich Kohlenmonoxid

(CO), Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>), Wasserstoff (H<sub>2</sub>), Methan (CH<sub>4</sub>), Kohlenwasserstoffe und Stickstoff enthält, wird der dem Vergaser nachgeordneten Verbrennungskammer zugeführt und dort vollständig verbrannt. Nicht brennbarer Abfall gelangt in die Verbrennungs- und Schmelzzone (1.000 bis 1.800 °C) am Boden und wird dort durch die Hitze des brennenden Koks zum Schmelzen gebracht. Vergasungsreaktionen wie Wasser-Gas-Verschiebungs-, Wasser-Gas- und Boudouard-Reaktion, die in Gleichung 1 bis 3 dargestellt sind, finden hauptsächlich in dieser Zone statt. Geschmolzenes Material wird von Zeit zu Zeit über ein Abstichloch abgelassen, in einem Wasserbad abgeschreckt und magnetisch in Schlacke und Metall getrennt. Schlacke und Metall werden vollständig recycelt, da sie nur geringe Mengen toxischer Schwermetalle wie Blei (Pb) und Zink enthalten.

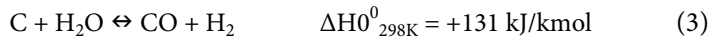
Boudouard-Reaktion



Wasser-Gas-Verschiebungsreaktion



Wasser-Gas-Reaktion



Die hohen Temperaturen und reduzierende Atmosphäre am Boden des Vergasers unterstützen die Verflüchtigung von toxischen Schwermetallen. Wegen der hohen Temperatur und der reduzierenden Atmosphäre wird bei der in Gleichung 1 und 3 gezeigten Boudouard- und Wasser-Gas-Reaktion CO erzeugt. Bei der Boudouard-Reaktion reagiert das durch die Verbrennungsreaktion erzeugte CO<sub>2</sub> mit dem Kohlenstoff, der in dem zugeführten Koks bzw. der Kohle gebunden ist, und wird in CO umgewandelt. Diese Reaktionen finden bei hohen Temperaturen um etwa 1.200 K statt. Das erzeugte CO kann dazu beitragen, die Bildung von Bleioxid (PbO) und Zinkoxid zu vermeiden. Nakata et al. [15] berichten, dass PbO in der reduzierenden Atmosphäre, die durch die Reaktionen 1 bis 3 erzeugt wird, zu metallischem Pb reduziert wird, welches sich leicht verflüchtigt. Dem gemäß verbleiben nur wenige toxische Schwermetalle im geschmolzenen Material, und man erhält hochwertige Schlacken- und Metallprodukte.

Dem Vergaser nachfolgend kommt ein Zyklonsystem zum Einsatz. Wie in Bild 3 dargestellt, besteht dieses System aus einem Fliehkraftabscheider und einem Staubbeschicker. Der vom Vergasungs- und Schmelzofen ausgeschiedene brennbare Staub wird dem Syngas durch den Zyklon entzogen. Die so gewonnene Kohle wird über eine Düse zurück in den Ofen eingeblasen. Dieses System hat drei wesentliche Vorteile [12]. Erstens wird die benötigte Koksmenge reduziert, da der eingeblasene brennbare Staub als Koksersatz mit der sauerstoffreichen Blasluft reagiert. Zweitens werden die Verbrennungsbedingungen in der Verbrennungskammer durch die Gasverbrennung mit weniger Staub verbessert. Und drittens wird die im nachgelagerten Bereich anfallende Menge an Flugasche verringert.

Die fühlbare Wärme des aus der Verbrennungskammer abgeleiteten Abgases wird über einem Dampferzeuger zurückgewonnen, der zur Stromerzeugung ein Dampfturbinensystem antreibt. Typische Werte für Dampfdruck und Temperatur sind 40 bar und 400 °C. Der erzeugte Strom wird für die Versorgung innerhalb der Anlage genutzt, und überschüssiger Strom wird an Dritte veräußert. Das Abgas wird nach der Abgaswärmerückgewinnung zur Abgasbehandlungssystem geleitet, um Chlorwasserstoff (HCl), Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>), Stickstoffoxide (NO<sub>x</sub>) sowie polychlorierte Dibenzop-dioxine und Dibenzofurane (PCDD/PCDF) zu entfernen.

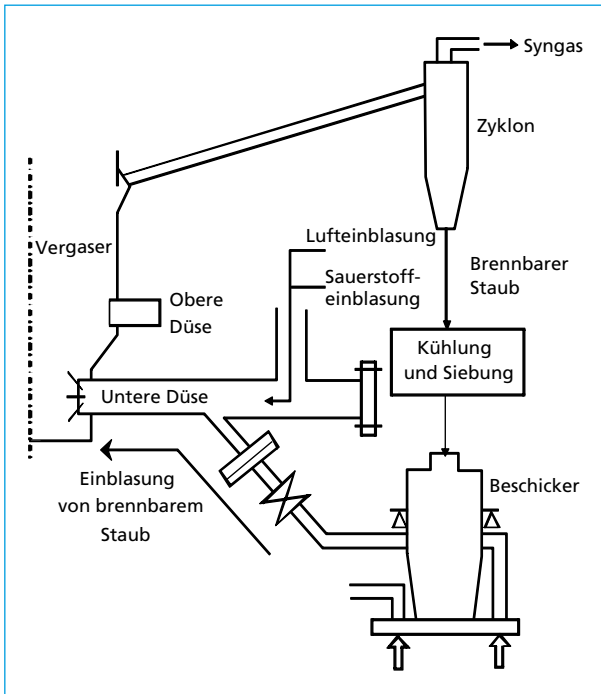


Bild 3:

Sammel- und Einblssystem für brennbaren Staub

### 2.3. Vergasungskriterien

Es werden oft mehrere unterschiedliche Kriterien für den Vergasungsprozess angeführt. Die beiden häufigsten sind Kaltgaswirkungsgrad (CGE) und Äquivalenzverhältnis (ER) [9]. CGE und ER sind im allgemeinen wie in Gleichung 4 und 5 definiert:

$$\text{CGE [\%]} = \frac{\text{Heizwert des Produktgases [MW]}}{\text{Heizwert des Ausgangsmaterials [MW]}} \cdot 100 \quad (4)$$

$$\text{ER [\%]} = \frac{\text{Gesamtmenge des eingeblasenen Sauerstoffs}}{\text{Stöchiometrische Sauerstoffmenge des Ausgangsmaterials}} \cdot 100 \quad (5)$$

Der Kohlenstoffumsatzgrad ist definiert als:

$$\text{Kohlenstoffumsatzgrad [\%]} = \frac{1 - \text{Kohlenstoff im Vergasungsrückstand [kmol/h]}}{\text{Kohlenstoff im Ausgangsmaterial [kmol/h]}} \cdot 100 \quad (6)$$

Diese Gleichung zeigt das Verhältnis zwischen Kohlenstoff im Ausgangsmaterial und in Gase umgewandelten Kohlenstoff an. Kohlenstoff im Vergasungsrückstand bezeichnet Kohlenstoff, der in Form von Kohle vom Vergaser ausgeschieden und in der Verbrennungskammer verbrannt wird. Schlacke und Metall, die am Boden austreten, weisen keine Glühverluste auf. Dies bedeutet, dass es keinen Kohlenstoffverlust in geschmolzenen Materialien gibt.

### 3. Ergebnisse und Diskussion

#### 3.1. Betriebsdaten

Tabelle 1 zeigt die typischen Betriebsdaten von zwei gewerblichen Anlagen. Der Siedlungsabfall-Durchsatz in Anlage A beträgt 251,8 Tonnen pro Tag, der in Anlage B 251,6 Tonnen pro Tag. In Anlage A werden pro Tonne Siedlungsabfall 173 kg Schlacke und 27 kg Metall produziert, wobei 33 kg Flugasche entstehen. Die Menge an Flugasche ist bei beiden Anlagen annähernd gleich. Die Syngas-Temperatur des Ofens in Anlage A beträgt 517 °C und liegt unter der von Anlage B.

Tabelle 1: Betriebsdaten von zwei exemplarischen gewerblichen Anlagen

	Einheit	Anlage A	Anlage B
Siedlungsabfall-Durchsatz	t/Tag	251,8	251,6
Koks	kg/t Siedlungsabfall	44,9	49,0
Naturgaseinspritzung	m <sup>3</sup> <sub>N</sub> /t Siedlungsabfall	4,31	-
Gichtgas-Temperatur des Ofens	°C	517	602
Schlackenprodukt	kg/t Siedlungsabfall	173	97
Metallprodukt	kg/t Siedlungsabfall	27	18
Flugasche	kg/t Siedlungsabfall	33	32
LHV von Syngas	MJ/m <sup>3</sup> <sub>N, d.b.</sub>	4,4	5,9
Kohlenstoffumsatzgrad	%	91,7	95,3
CGE	% <sub>LHV</sub>	54,6	49,2
ER	-	0,34	0,26
Stromerzeugung	kWh/t Siedlungsabfall	408	673
Brutto-Stromerzeugungswirkungsgrad	%	18,9	23,0

Das Äquivalenzverhältnis (ER) von Anlage A, das 0,34 beträgt, ist aufgrund des Aschegehalts höher als das von Anlage B. In diesem System wird Asche durch die Verbrennungswärme von Koks und Kohle am Boden des Ofens geschmolzen. Dies zeigt an, dass ein höherer Aschegehalt mehr Energie erfordert, die durch die partielle

Oxidationsreaktion von Koks und Kohle erzeugt wird. In Anlage A wird Bodenasche mit Siedlungsabfall behandelt, und der Aschegehalt der verarbeiteten Abfälle beträgt bis zu 18,5 %<sub>a.r.</sub>. Der ER-Wert ist daher bei Anlage A wesentlich höher als bei Anlage B.

Der Nettoheizwert (NCV) des Syngases beträgt 4,4 MJ/m<sup>3</sup><sub>N, d.b.</sub> in Anlage A und 5,9 MJ/m<sup>3</sup><sub>N, d.b.</sub> in Anlage B. Der Nettoheizwert des Syngases wird durch einen Luftvergasungsprozess gesenkt. Diese Abfallvergasungstechnik basiert auf einem sogenannten Wanderbett-Luftvergaser. Syngas wird durch Stickstoff verdünnt und weist einen geringeren unteren Heizwert (LHV) auf als in einem Sauerstoffvergaser und einem Dampfvergasungsprozess. Die LHV-Werte in dieser Untersuchung befinden sich im Bereich der Ergebnisse anderer Berichte, obwohl deren Experimente mit Wirbelschicht-Luftvergasern durchgeführt wurden. Darüber hinaus kann sich auch der Feuchtigkeitsgehalt des Ausgangsmaterials auf den Nettoheizwert [11] oder Bruttoheizwerte [7] auswirken. Doherty et al. [7] berichten, dass CO und CH<sub>4</sub> bei einer Zunahme des Feuchtigkeitsgehalts im Ausgangsmaterial eine Verschiebung und Umformung erfahren und eine Erzeugung von CO<sub>2</sub> bewirken. Diese Faktoren führten in dieser Untersuchung zu einem niedrigen NCV-Wert.

Der CGE-Wert des Vergasers in Anlage A beträgt 54,6 Prozent LHV, und der des Vergasers in Anlage B 49,2 Prozent LHV. Im Vergleich zu früheren Ergebnissen bei der Vergasung von Biomasse [3, 6, 7, 10, 13] sind die CGE-Werte in dieser Untersuchung moderat. Dies ist vornehmlich auf zwei Faktoren zurückzuführen: die Luftvergasung und der Feuchtigkeitsgehalt des Siedlungsabfalls. Wie zuvor erläutert, wird Syngas in einem Luftvergaser durch Stickstoff verdünnt, was den NCV-Wert senkt. Darüber hinaus ist der Feuchtigkeitsgehalt des Siedlungsabfalls als bedeutender Faktor anzusehen. Doherty et al. [7] stellten fest, dass der CGE-Wert bei steigendem Feuchtigkeitsgehalt der Biomasse abnimmt. Der Feuchtigkeitsgehalt des Siedlungsabfalls in Anlage A beträgt 42,8 %<sub>a.r.</sub>, der in Anlage B 44,0 %<sub>a.r.</sub> und ist wesentlich höher als der von Biomasse in früheren Berichten. Diese Faktoren wirken sich also auf den Kaltgaswirkungsgrad im Vergaser aus.

Der Kohlenstoffumsatzgrad beträgt bis zu 91,7 Prozent bzw. 95,3 Prozent. Der Rest der Kohle wird vom Vergaser ausgeschieden und in der Verbrennungskammer verbrannt. Beide Ergebnisse zeigen einen hohen Kohlenstoffumsatzgrad [4, 11]. Dieser hohe Kohlenstoffumsatzgrad wird zudem durch die Anwendung eines Einblassystems für brennbaren Staub verbessert (Bild 2). In diesem System wird ein Großteil der vom Vergaser ausgeschiedenen Kohle durch einen Fliehkraftabscheider gesammelt und wieder in den Vergaser eingeblasen. Die eingeblasene Kohle wird in Gase umgewandelt, wodurch der Kohlenstoffumsatzgrad verbessert wird.

Tabelle 1 zeigt auch die Bruttostromerzeugung und ihren Wirkungsgrad. Die Bruttostromerzeugung in den beiden Anlagen beträgt 408 kWh bzw. 673 kWh pro Tonne Siedlungsabfall. Der Brutto-Stromerzeugungswirkungsgrad beträgt 18,9 Prozent bzw. 23,0 Prozent. Verglichen mit dem durchschnittlichen Brutto-Stromerzeugungswirkungsgrad (11,2 Prozent) von Siedlungsabfall-Verbrennungsanlagen in Japan [14] sind die Brutto-Stromerzeugungswirkungsgrade in dieser Untersuchung sehr hoch.



Die Wirkungsgrade sind jedoch niedriger als die in der EU. Hierfür gibt es drei mögliche Ursachen: Prioritäten in der Abfallwirtschaft (als erstrangige Priorität nicht die Energierückgewinnung, sondern eine Reduzierung des Abfallvolumens), kleinere Anlagen und der Feuchtigkeitsgehalt des zu verarbeitenden Abfalls (etwa 40 %<sub>a.r.</sub> bis 50 %<sub>a.r.</sub>). Heutzutage stößt die Abfallheizkraft jedoch auch in Japan mehr und mehr auf Interesse, und der Stromerzeugungswirkungsgrad wurde verbessert.

Gegenwärtig werden neue Techniken für die Abfallvergasung mit Direktschmelze entwickelt[23]. Demzufolge kann der Koksverbrauch auf 2 %<sub>wt</sub> oder 3 %<sub>wt</sub> gesenkt werden.

### 3.2. Abfallflexibilität

Abfallflexibilität ist einer der Vorzüge der Abfallvergasung mit Direktschmelze. Dank der Hochtemperaturvergasung können verschiedene Arten von Abfällen ohne Vorbehandlung verarbeitet werden. Klärschlamm, Klinikabfälle, Bodenasche aus Verbrennungsanlagen, aus Abfalldeponien rückgewonnene Abfälle, Katastrophenabfall, nicht brennbare Materialien von Recyclingcentern, Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW), und Reststoffe aus Altfahrzeug-Shredderanlagen (Auto-RESH) können in den gewerblichen Referenzanlagen zusammen mit Siedlungsabfall verarbeitet werden. In diesen Abfällen enthaltene brennbare Stoffe werden über eine Dampfkesselanlage in Energie umgesetzt, während nicht brennbare Stoffe in Wertstoffe wie Schlacke und Metall umgewandelt werden. Dadurch lässt sich die endgültige Deponieabfallmenge minimieren. Diese gemeinsame Verarbeitung von Abfall und Recyclingmaterial zu Schlacke und Metall wird Co-Vergasung genannt. Die Co-Vergasung bietet sich daher als potenzielle Lösung zur Energie- und Materialrückgewinnung in einem Durchgang an.

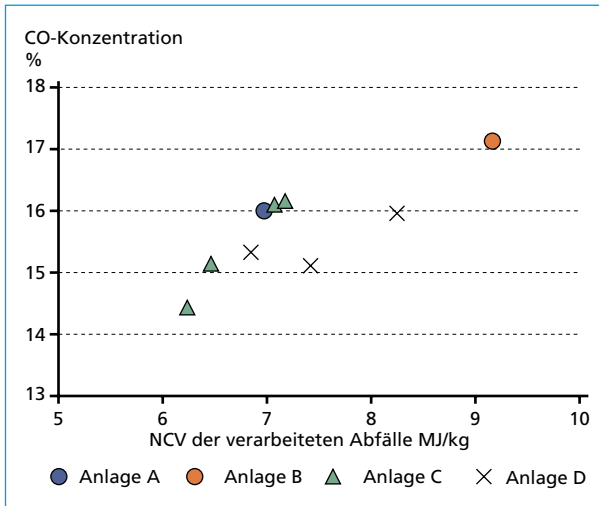


Bild 4:

Beziehung zwischen Nettoheizwert und CO-Konzentrationen

Die Zusammensetzung des Abfalls und insbesondere sein Nettoheizwert beeinflussen die Zusammensetzung des Synthesegases. Bild 4 verdeutlicht die Beziehung zwischen CO-Konzentration und Nettoheizwert des verarbeiteten Ausgangsmaterials. Anlagen

A, C und D verarbeiten jeweils Bodenasche von anderen Verbrennungsanlagen, aus Abfalldeponien rückgewonnene Abfälle und Klärschlamm zusammen mit Siedlungsabfall. Höhere Nettoheizwerte des zu verarbeitenden Abfalls führen zu höheren CO-Konzentrationen im Syngas. Dies bedeutet, dass der Nettoheizwert des Ausgangsmaterials bei der Co-Vergasung von Siedlungsabfall mit anderen Abfällen die CO-Konzentrationen im Syngas beeinflusst.

### 3.3. Emissionen

Tabelle 2 zeigt die Abgasbestandteile in zwei gewerblichen Anlagen. Die eine Anlage arbeitet mit einem Nasswäschersystem, die andere mit einer trockenen Abgasreinigungssystem. In beiden Anlagen erfolgt keine Aktivkohleeinblasung. Luftschadstoffe wurden am Ein- und Auslass des Gewebefilters (BF) sowie am Kamin gemessen. Am Kamin erfüllen die Messungen aller Bestandteile die Richtwerte und EU-Richtlinie, wie Tabelle 2 verdeutlicht.

Tabelle 2: Abgasbestandteile der Anlagen A und E

	Einheit	Anlage A			Anlage E		
		Gewebefilter-Einlass	Gewebefilter-Auslass	Schornstein	Gewebefilter-Einlass	Gewebefilter-Auslass	Schornstein
SO <sub>2</sub>	mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub>	12,7	-	< 3	4,8	-	< 3,3
NO <sub>x</sub>	mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub>	264	-	8,9	188	-	20,9
HCl	mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub>	180	1,7	< 0,6	171	-	3,7
CO	mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub>	< 4,0	< 4,0	< 4,0	5,6	-	6,2
PCDD/PCDF	ng-TEQ/m <sup>3</sup> <sub>N</sub>	0,79	0,74	0,0066	1,4	1,2	0,00087

<sup>1</sup> Konzentrationen basieren auf 11%-O<sub>2</sub>.

<sup>2</sup> HCl, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>: n = 4, CO: 4 Stunden Dauermessung, PCDD/PCDF: n = 2

Die geringen HCl- und SO<sub>2</sub>-Emissionen sind wahrscheinlich auf die Vergaser-Betriebsbedingungen zurückzuführen. Die Vergasungstechnik mit Direktschmelze arbeitet zur Regelung der Viskosität und Fließfähigkeit der geschmolzenen Materialien mit Kalksteinzugabe in den Vergaser. Aus dem Kalkstein entstandenes Calciumoxid (CaO) reagiert mit Chlor und Schwefel, und es wird angenommen, dass hierdurch gasförmige Chlor- (HCl) und Schwefelverbindungen (SO<sub>2</sub>) reduziert werden.

Die PCDD/PCDF-Konzentrationen im Abgas sind sehr niedrig. Dies erklärt sich durch den hohen Kohlenstoffumsatzgrad. Es wird daher weniger Kohle vom Vergaser ausgeleitet. Dies führt zu einer Gas-Gas-Verbrennung (homogene Verbrennung) in der Verbrennungskammer und verbessert die Verbrennungsbedingungen im Temperaturbereich zwischen 950 und 1.050 °C. Als Ergebnis wird eine stabile und vollständige Syngas-Verbrennung erzielt. Ein Einblssystem für brennbaren Staub sorgt für einen hohen Kohlenstoffumsatzgrad und trägt dadurch zusätzlich zur Optimierung der Bedingungen in der Verbrennungskammer bei [12].

### 3.4. Schlacken-, Metall- und Flugaschebestandteile

Tabelle 3 führt die Konzentrationen von Schwermetallen in Schlacke, Metall und Flugasche von zwei gewerblichen Anlagen in Japan auf. In beiden Anlagen waren Si, Ca und Al die in der Schlacke am häufigsten enthaltenen Elemente. Die Blei- und Zinkkonzentrationen in Schlacke sind äußerst gering. Insbesondere die Bleikonzentration in Schlacke lag in beiden Anlagen unter 0,001 %<sub>db</sub>. Eisen ist mit 85,0 %<sub>db</sub> bzw. 84,0 %<sub>db</sub> ein Hauptbestandteil im Metall. Das Metall enthält auch relativ viel Kupfer.

Tabelle 3: Die Konzentrationen von Schwermetallen zweier gewerblicher Anlagen in Japan

	Einheit	Anlage A			Anlage E		
		Schlacke	Metall	Flugasche	Schlacke	Metall	Flugasche
Si	% <sub>db</sub>	16	2,0	3,1	16	5,1	4,7
Ca	% <sub>db</sub>	23	0,18	22	26	0,23	22
Al	% <sub>db</sub>	8,3	0,096	2,3	6,6	0,081	2,3
Mg	% <sub>db</sub>	1,2	0,029	0,74	0,82	0,016	0,77
Pb	% <sub>db</sub>	< 0,001	0,018	1,1	< 0,001	0,013	0,33
Zn	% <sub>db</sub>	0,027	0,054	5,6	0,0081	0,024	2,2
Na	% <sub>db</sub>	1,9	0,084	4,4	1,3	0,077	4,2
K	% <sub>db</sub>	0,73	0,0096	4,9	0,67	0,019	5,7
Cl	% <sub>db</sub>	0,01	< 0,01	15	< 0,01	< 0,01	17
S	% <sub>db</sub>	0,22	0,035	1,4	0,17	0,031	1,5
Cu	% <sub>db</sub>	0,018	8,9	0,29	0,014	7,5	0,17
Fe	% <sub>db</sub>	1,5	85,0	0,52	1,1	84,0	0,79
Hg	mg kg <sup>-1</sup>	< 0,01	< 0,01	1,00	< 0,01	< 0,01	1,1
Cr	% <sub>db</sub>	0,036	1,1	0,0098	0,018	0,95	0,011

Die beiden Anlagen wiesen unterschiedliche Schwermetallkonzentrationen in Flugasche auf. Die Bleikonzentration in Anlage A war 1,1 %<sub>db</sub> und damit etwa viermal höher als die in Anlage B. Auch die Zinkkonzentration war in Anlage A höher als in Anlage B. Anlage A arbeitet mit Co-Vergasung von Siedlungsabfall mit Bodenasche aus anderen Verbrennungsprozessen, wobei mehr Schwermetalle in den Verbrennungsprozess gelangen. Trotz der Unterschiede im verarbeiteten Abfall sind die Schwermetallkonzentrationen in Schlacke und Metall bei beiden Anlagen annähernd gleich, und es sind nur in den Flugaschekonzentrationen Abweichungen zu verzeichnen.

Diese Ergebnisse lassen darauf schließen, dass die Schwermetallkonzentrationen in Schlacke und Metall unabhängig vom verarbeiteten Abfall nahezu stabil sind.

### 3.5. Schwermetallverteilungen

Bild 5 zeigt die Schwermetallverteilung in einer gewerblichen Vergasungsanlage. Einer vorangehenden Untersuchung gemäß [16] sind die Konzentrationen von Schwermetallen nach der Entfernung von Staub durch einen Gewebefilter (BF) sehr gering und

vernachlässigbar. Auch Takaoka et al. [19] berichten, dass die meisten Schwermetalle mit Wirkungsgraden von mehr als 99,9 Prozent durch einen Gewebefilter entfernt wurden. Es wird daher in dieser Untersuchung angenommen, dass Schwermetalle sich durch einen Gewebefilter vollständig entfernen lassen und so die Konzentration der Schwermetalle im Abgas  $0 \text{ mg/m}^3_{\text{N}}$  beträgt. Weiterhin wird zur Berechnung des Verteilungsfaktors angenommen, dass der Ausstoß von fünfzig Prozent der Stoffe sich unterhalb der Nachweisgrenze bewegt.

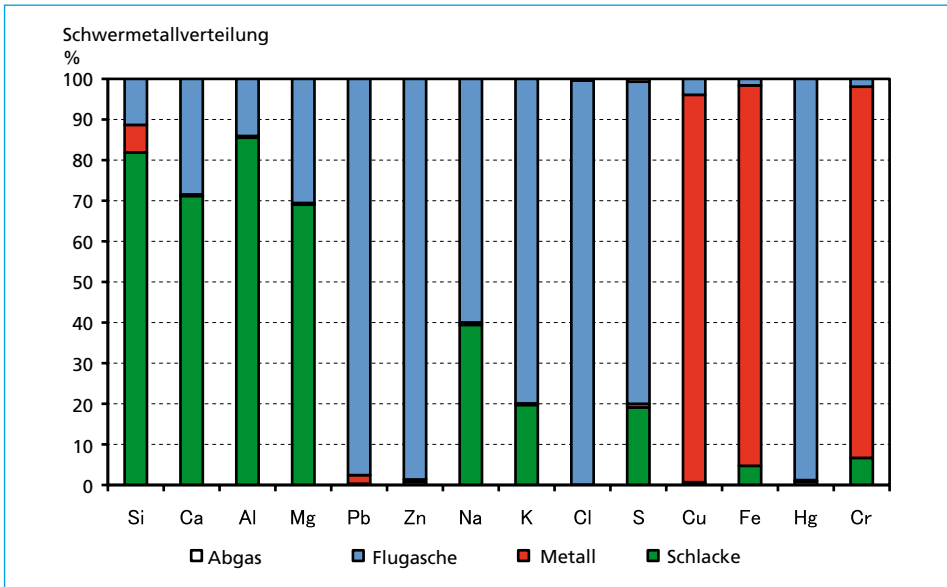


Bild 5: Schwermetallverteilungen einer gewerblichen Vergasungsanlage

Die meisten Schwermetalle mit niedrigem Siedepunkt wie Blei, Zink und Quecksilber waren in Flugasche zu finden: Die Verteilungsrate für Blei in Flugasche betrug bei Anlage B 97,6 Prozent. Die von Zink betrug 96,9 Prozent. Die meisten Schwermetalle mit hohem Siedepunkt wie Eisen und Kupfer waren in Metall enthalten, und ihre Verteilungsraten betragen 93,7 Prozent und 95,4 Prozent. Der größte Anteil an Si, Ca, Al und Mg war in der Schlacke zu finden. K und Gesamtschwefel (T-S) waren mit fluktuierenden Verteilungsraten hauptsächlich in der Flugasche zu finden. Diese Verteilungstendenzen decken sich mit denen früherer Untersuchungen [16, 22].

Der Europäischen Kommission gemäß [8] beträgt die Verteilungsrate für Blei bzw. Zink in Flugasche 28 Prozent (+/-5 %) bzw. 54 Prozent (+/-3 %). Der Rest, 72 Prozent des Bleis und 46 Prozent des Zinks, ist in der Bodenasche enthalten. Ähnliche Ergebnisse wurden von Arena und Di Gregorio berichtet [17]. Beim Vergleich mit Verbrennungssystemen werden gewisse Unterschiede in der Schwermetallverteilung deutlich. Insbesondere die Verteilungsraten von Blei und Zink in Flugasche wiesen beträchtliche Unterschiede auf.

Nach einer thermodynamischen Berechnung werden Blei und Zink in Form eines Sulfids oder Oxids an Schlacke abgegeben. Osada et al. [17] zeigten, dass eine reduzierende Atmosphäre mit hohen Temperaturen die Bildung von Blei- und Zinksulfid oder -oxid wirksam unterbindet. Diese Tendenz kann unabhängig von der Zusammensetzung des zu verarbeitenden Abfalls in der Verteilung von toxischen Schwermetallen wie Blei, Zink und Quecksilber beobachtet werden.

### 3.6. Auswaschverhalten und Nutzung der Schlacke

Es wurde bereits verdeutlicht, dass die Schlackenprodukte in dieser Untersuchung annähernd keine schädlichen Schwermetalle wie Blei enthalten. Tabelle 4 zeigt die Ergebnisse des Schlacken-Auswaschtests (in Übereinstimmung mit JIS K0058) in Anlage A. Die beim Schlacken-Auswaschtest erhaltenen Bleiwerte bewegen sich unterhalb von 0,005 mg/l und liegen damit weit unter dem Referenz-Sollwert (weniger als 0,01 mg/l).

Tabelle 4: Ergebnisse des Schlacken-Auswaschtests in Anlage A

	Auswaschtest		Säure-Extraktionstest	
	Referenz-Sollwert mg/l	Messergebnis	Referenz-Sollwert mg/kg	Messergebnis
Cd	< 0,01	< 0,001	< 150	< 5
Pb	< 0,01	< 0,005	< 150	18
Cr <sup>6+</sup>	< 0,05	< 0,02	< 250	< 5
As	< 0,01	< 0,001	< 150	< 5
T-Hg	< 0,0005	< 0,0005	< 15	< 0,05
Se	< 0,01	< 0,001	< 150	< 5
CN	-	-	< 50	< 1
F	-	-	< 4000	172
B	-	-	< 4.000	260
Metallisches Fe	-	-	< 1,0 %	0,18

<sup>1</sup> Sechsmalige Durchführung beider Messungen

Der Säure-Extraktionstest (in Übereinstimmung mit JIS K0058) ergab einen Wert von 18,0 mg/kg, der ebenfalls weit unter dem Referenz-Sollwert (weniger als 150 mg/kg) liegt. Auch die Werte, die der Schlacken-Auswaschtest und der Säure-Extraktionstest für Cd und andere Schwermetalle lieferten, sind wesentlich niedriger als die Referenz-Sollwerte. Gestützt durch die oben dargelegten Erkenntnisse ist es offensichtlich, dass die durch Behandlung mit dieser Vergasungstechnik erhaltene geschmolzene Schlacke nur in geringem Maße schädliche Metalle wie Blei enthält, stabil ist und ohne zusätzliche Behandlung als Verbundstein- und Betonzuschlag oder für Baustoffe verwendet werden kann (Bild 6). Es wurden auch weitere Anwendungsbereiche für Schlacke entwickelt, wie beispielsweise die in Bild 6 gezeigte landwirtschaftliche Nutzung.

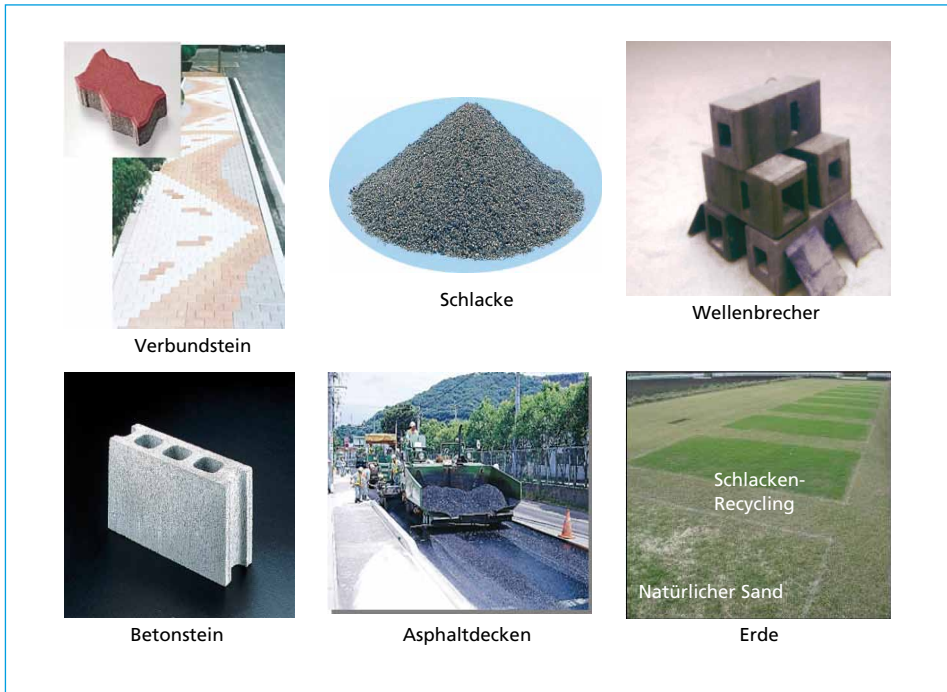


Bild 6: Mögliche Verwertungswege für geschmolzene Schlacke aus Vergasungsanlagen

## 4. Schlussfolgerungen

Dieser Beitrag behandelt die Abfallvergasung mit Direktschmelze, eine Vergasungstechnik, die weltweit mit den zahlreichsten Referenzen aufwartet und sich als Möglichkeit zur Energie- und Materialrückgewinnung in einem Durchgang anbietet. Die erste Abfallvergasungsanlage dieser Art ist seit 1979 in Betrieb.

Abfallflexibilität ist einer der Vorzüge der Vergasungstechnik mit Direktschmelze. Der Abfall wird dem Vergaser ohne Vorbehandlung zugeführt. Die Referenzanlagen in Japan verarbeiten nicht nur Siedlungsabfall, sondern auch andere Abfälle wie Klärschlamm, Klinikabfälle, Bodenasche aus Verbrennungsanlagen, aus Abfalldeponien rückgewonnene Abfälle und Reststoffe aus Altfahrzeug-Shredderanlagen.

Das System arbeitet sehr schadstoffarm. Insbesondere der Chlorwasserstoff- und Schwefeldioxydausstoß ist dank der Entschwefelungswirkung von Kalkstein im Vergaser äußerst gering. Die Emissionen am Kamin sind wesentlich geringer als die Vorgaben europäischer Vorschriften.

Durch die Hochtemperaturvergasung werden toxische Schwermetalle wie Blei und Zink vom Vergaser verflüchtigt und sammeln sich in Flugasche. Die Schlacken- und Metallprodukte enthalten daher nur geringe Mengen toxischer Schwermetalle, so dass ein vollständiges Recycling in Verbundstein- und Betonzuschlag oder Baustoffe ohne zusätzliche Behandlung möglich ist.

## 5. Literatur

- [1] Aigner, I., Pfeifer, C., Hofbauer, H., *Fuel*, 90, 2404-2412, 2011.
- [2] Arena U., Di Gregorio F., 2013. *Waste Management* 33, 1142-1150
- [3] Arena, U., Zaccariello, L., Mastellone, M.L., *Waste Management*, 30, 1212–1219, 2010.
- [4] Corella J, Toledo J.M., Molina G., 2007. A Review on Dual Fluidized-Bed Biomass Gasifiers. *Ind. Eng. Chem. Res.* 46, 6831-6839.
- [5] De Boom A., Degrez M., Hubaux P., Lucion C., *Waste Management* 31, 1505-1513, 2011.
- [6] De Jong, W., Ünal, Ö., Andries, J., Hein, K.R.G., Splietho, H., 2003. *Biomass and Bioenergy* 25, 59-83.
- [7] Doherty, W., Reynolds, A., Kennedy, D., 2009. *Biomass and bioenergy* 33, 1158-1167
- [8] European Commission, 2006. *Integrated Pollution Prevention and Control, Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration*. August, 2006.
- [9] Higman, C., van der Burgt M., *Gasification*. Gulf Professional Publishing, United States of America, 2003.
- [10] Li, X.T., Grace, J.R., Lim, C.J., Watkinson, A.P., Chen, H.P., Kim, J.R., 2004. *Biomass and Bioenergy* 26, 171-193.
- [11] Lv, P.M., Xiong, Z.H., Chang, J., Wu, C.Z., Chen, Y., Zhu, J.X., 2004. *Bioresource Technology* 95, 95-101.
- [12] Manako K., Kashiwabara T., Kobata H., Osada M., Takeuti S., Mishima T., *Proceedings of DIOXIN 2007 International Symposium*, 940-943, 2007.
- [13] Mastellone, M.L., Zaccariello L., Arena, U., *Fuel*, 89, 2991-3000, 2010.
- [14] Ministry of the Environment government of Japan, 2010. *Annual report on the Environment and the Sound Material- Cycle Society in Japan 2010*.
- [15] Nakata, H., Mihara, N., Kawaguchi, Y., Osada, S., Kuchar, D., Matsuda, H., 2008. *Journal of Material Cycles Waste Management* 10, 19-23.
- [16] Osada M., Tanigaki N., Takahashi S., Sakai S., *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 93-101, 2008
- [17] Osada, S., Kuchar, D., Matsuda, H., *Journal of Material Cycles Waste Management*, 11, 367-375, 2009.
- [18] Pfeifer, C., Hofbauer H., *Powder Technology*, 180, 9-16, 2008.
- [19] Takaoka M, Shiota K, Imai G and Oshita K., 2012. *Proceedings 7th international conference on “combustion, incineration/pyrolysis and emission control (i-CIPEC 2012)”*, Seoul/Ilsan, Korea 4–7, September 2012, pp. 507–513.
- [20] Tanigaki N, Fukinaka N, Ishida Y and Osada M., 2012. *Proceedings 7th international conference on “combustion, incineration/pyrolysis and emission control (i-CIPEC 2012)”*, Seoul/Ilsan, Korea 4–7, September 2012, pp. 129–135.
- [21] Tanigaki, N., Fujinaga, Y., Kajiyama H., Ishida, Y., 2013a. *Waste Management & Research* 31, 11, 1118-1124.
- [22] Tanigaki N. Manako K. Osada M., *Waste Management*, 32, 667–675, 2012.
- [23] Tanigaki, N., Yoshimoto, Y., Ishida, Y., Osada, M., 2013. *Proceedings of 14th International Waste Management and Landfill Symposium (Sardinia 2013)*, Sep. 30 – Oct. 4, 2013, S. Margherita di Pula, Italy.



# Doosan Lentjes

Helping you recover energy from waste



At Doosan Lentjes we help our customers convert millions of tonnes of residual waste into energy every year. As part of the Doosan Group, we provide tailor-made chute-to-stack solutions for all waste incineration requirements. Our engineering, procurement and construction (EPC) capabilities make us the perfect partner for your waste-to-energy project.

To learn how Doosan Lentjes' technologies can help you, contact us on:  
Tel: +49 (0) 2102 166 0 Email: DL.Info@doosan.com



[www.doosanlentjes.com](http://www.doosanlentjes.com)